ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2008
Seria: AUTOMATYKA z. Nr kol.

Artur BABIARZ, Krzysztof JASKOT
Politechnika Śląska

# ANALIZA RUCHU ROBOTA DWUNOŻNEGO

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano kinematykę dwunożnego robota kroczącego posiadającego 15 stopni swobody. Wszystkie połączenia ruchowe są typu obrotowego. Pomiary zakresów zmian poszczególnych kątów przeprowadzono za pomocą urządzenia 3DM-GX1 firmy Microstrain. W ramach pracy przedstawiono również symulator robota dwunożnego.

# ANALYSIS OF BIPED ROBOT MOTION

**Summary.** This paper presents kinematics of biped robot which has 15 degrees of freedom. Each joint has from 1 to 3 degrees of freedom. A range of change each configuration coordinates is computed using 3DM-GX1 an inertial measurement unit (IMU). At the end of the paper we show computer program that can be use to simulations of different robot motion.

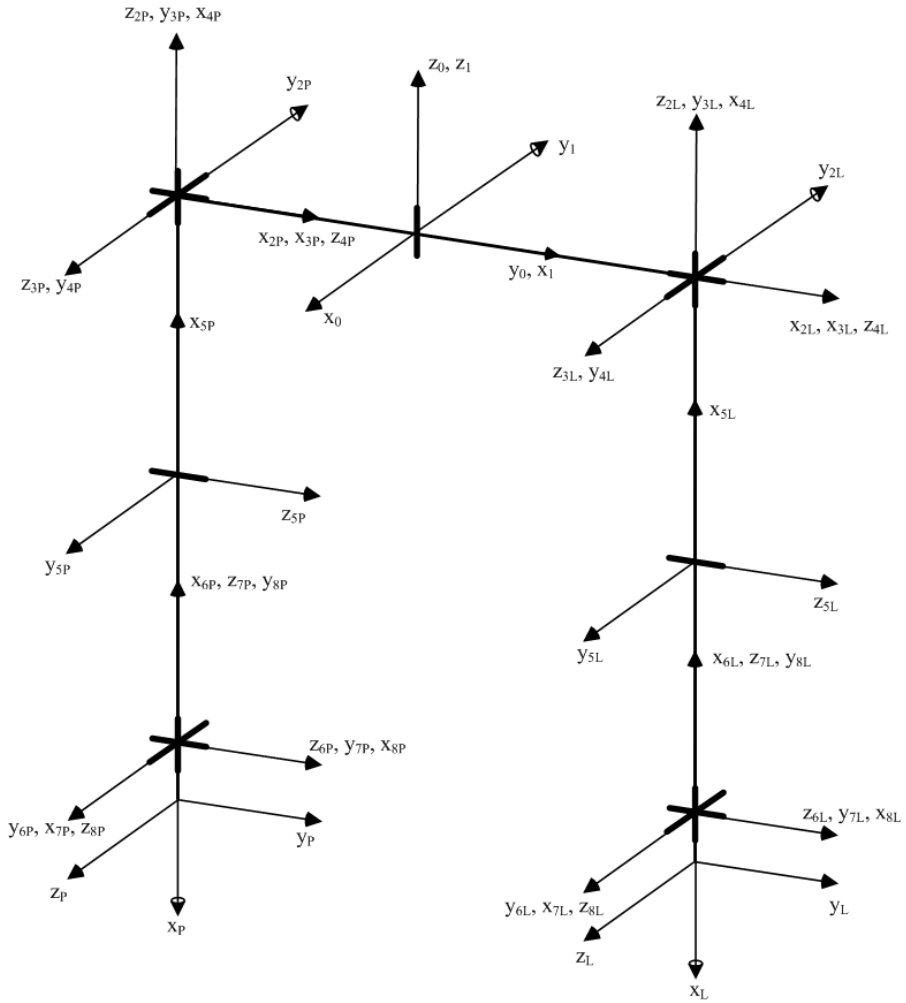
## 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach roboty kroczące dwunożne stanowią bardzo ważne pole badań w robotyce. We wszystkich przypadkach konstrukcji tego typu maszyn, można odnaleźć analogię do układu ruchowego ciała ludzkiego [2,9]. Jest to spowodowane ciągłą fascynacją organizmem ludzkim, a także jego szybkością adaptacji do zmieniających się warunków otoczenia. Konstruowane roboty kroczące posiadają od trzech do sześciu stopni swobody przypadających na jedną nogę [5,10]. Połączenia ruchowe są upraszczane do połączeń obrotowych występujących w robotach manipulacyjnych. Wynika to z faktu bardzo skomplikowanej budowy stawów występujących
w kończynach dolnych. Przykładem może być staw kolanowy, który zazwyczaj jest reprezentowany, jako połączenie obrotowe o jednym stopniu swobody. Można jednak stwierdzić, że na skutek odkształceń stawu powstaje dodatkowy stopień swobody w postaci obrotu [1]. Chęć bardzo dokładnego odwzorowania ruchów człowieka prowadzi do powstawania coraz to bardziej złożonych jednostek napędowych, tak pod względem przekazywania napędu, jak i masy własnej [2]. Punktem wyjściowym do rozwiązań konstrukcyjnych powinien być model kinematyki prostej robota dwunożnego oraz analiza ruchu poszczególnych połączeń ruchowych.

## 2. Kinematyka robota dwunożnego

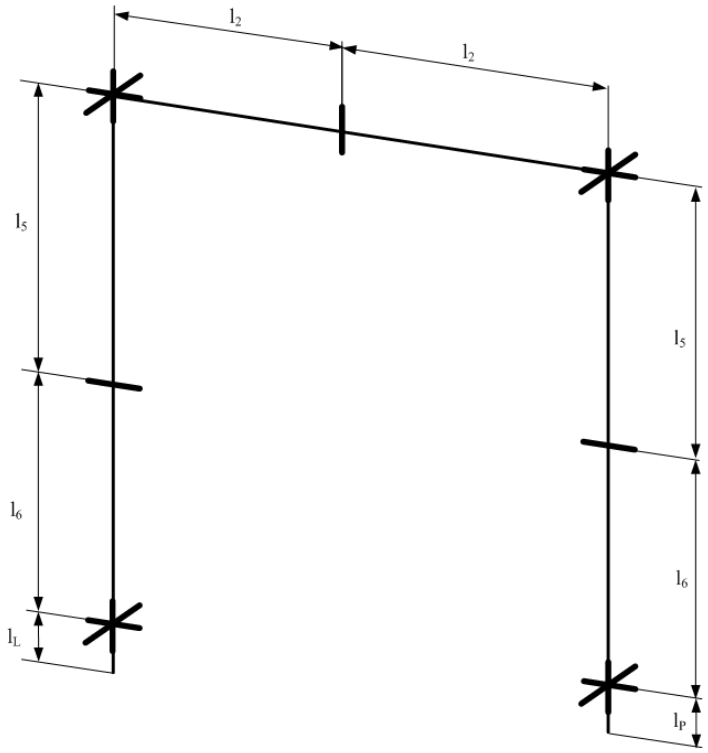
Rozpatrywany w pracy robot posiada 15 stopni swobody:
- trzy stopnie w stawie biodrowym,
- jeden stopień w stawie kolanowym,
- trzy stopnie w stawie kostkowym,
- jeden stopień w stawie miednicowym.

Wszystkie pary kinematyczne są parami obrotowymi.
Równania kinematyki prostej wyprowadzono na podstawie standardowej notacji Hartenberga-Denavita [7,8]. Schemat kinematyczny ze skojarzonymi układami współrzędnych przedstawiono na rysunku 1.




Rys. 1. Schemat kinematyczny robota kroczącego

Wymiary robota dwunożnego są identyczne, jak wymiary mężczyzny w średnim wieku o wzroście równym 170 cm [4]. Oznaczenia wymiarów przedstawiono na rysunku 2.




Rys. 2. Wymiary robota dwunożnego

Dzięki takiemu skojarzeniu układów współrzędnych z poszczególnymi członami robota dwunożnego można wyznaczyć macierze $\mathbf{A_i}$ opisujące położenie i orientację członów. Przyjmuje się następujące oznaczenia $\mathbf{A_1}$ opisuje położenie i orientację pierwszego członu względem układu bazowego (członem bazowym, inaczej zerowym, jest nieruchoma miednicy), $\mathbf{A_{iL}}$, $\mathbf{A_{iP}}$ są odpowiednio przekształceniami pomiędzy i-1-szym, a i-tym układem współrzędnych lewej i prawej nogi.

$$\mathbf{A}_1 = Rot(z,\theta_1) \tag{1}$$

$$\mathbf{A_{2L}} = Rot(z,\theta_{2L})Trans(l_2,0,0) \tag{2}$$

$$\mathbf{A_{3L}} = Rot(z,\theta_{3L})Rot(x,\alpha_{3L}) \tag{3}$$

$$\mathbf{A_{4L}} = Rot(z,\theta_{4L})Rot(x,\alpha_{4L}) \tag{4}$$

$$\mathbf{A_{5L}} = Rot(z,\theta_{5L})Trans(l_5,0,0) \tag{5}$$

$$\mathbf{A_{6L}} = Rot(z,\theta_{6L})Trans(l_6,0,0) \tag{6}$$

$$\mathbf{A_{7L}} = Rot(z,\theta_{7L})Rot(x,\alpha_7) \tag{7}$$

$$\mathbf{A_{8L}} = Rot(z,\theta_{8L})Rot(x,\alpha_8) \tag{8}$$

Natomiast macierz, która opisuje położenie i orientację elementu wykonawczego (stóp robota) względem członu ósmego, jest określona przekształceniem (9) i (10), odpowiednio dla lewej i prawej nogi.

$$\mathbf{E_L} = Rot(z,-\theta_L)Trans(l_L,0,0) \tag{9}$$

$$\mathbf{E_P} = Rot(z,-\theta_P)Trans(l_P,0,0) \tag{10}$$

Zakresy zmian kątów w poszczególnych połączeniach ruchowych wyznaczono na podstawie pomiarów ruchu kończyn dolnych człowieka. Do pomiarów wykorzystano układ inklinometru 3DM-GX1 firmy Microstrain [3]. Prezentowany układ pozwala na odczyt kątów na trzy sposoby: kwaternionów, macierzy obrotów oraz katów Eulera. Paramerty Hartenberga-Denavita przedstawiono w tabeli 1.

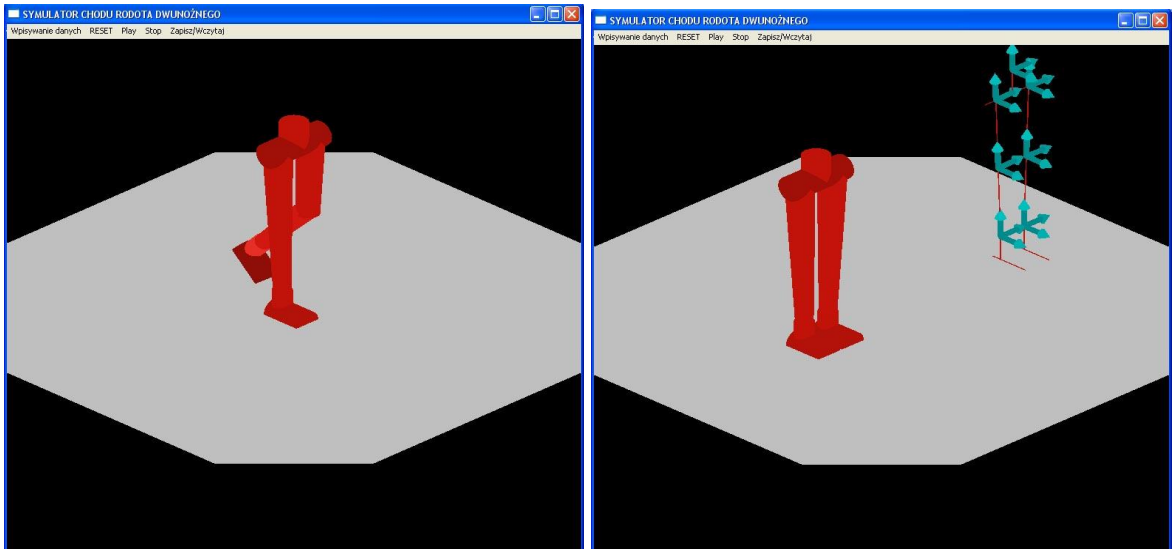
Tabela 1

Parametry kinematyki robota kroczącego

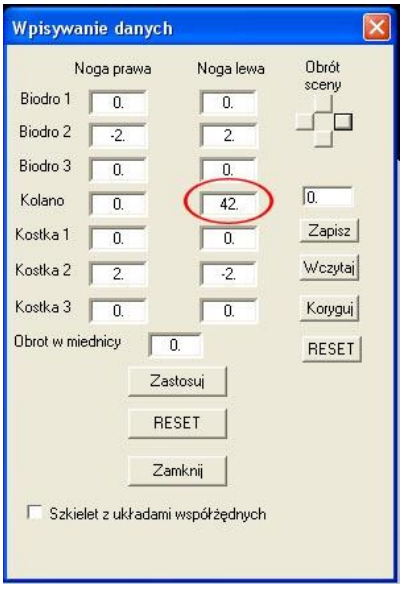
| Nr członu | $\theta_i$ [˚] | $\lambda_i$ [m] | $l_i$ [m] | $\alpha_i$ [˚] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -15÷15 | 0 | 0 | 0 |
| Lewa noga | | | | |
| Nr członu | $\theta_{iL}$ [˚] | $\lambda_i$ [m] | $l_i$ [m] | $\alpha_{iL}$ [˚] |
| 2 | -15÷15 | 0 | 0,16 | 0 |
| 3 | -15÷15 | 0 | 0 | 90 |
| 4 | -20÷60 | 0 | 0 | 90 |
| 5 | 0÷120 | 0 | -0,44 | 0 |
| 6 | -10÷30 | 0 | -0,45 | 0 |
| 7 | -10÷10 | 0 | 0 | 90 |
| 8 | -10÷10 | 0 | 0 | 90 |
| Prawa noga | | | | |
| Nr członu | $\theta_{iP}$ [˚] | $\lambda_i$ [cm] | $l_i$ [cm] | $\alpha_{iP}$ [˚] |
| 2 | -15÷15 | 0 | -0,16 | 0 |
| 3 | -15÷15 | 0 | 0 | 90 |
| 4 | -20÷60 | 0 | 0 | 90 |
| 5 | 0÷120 | 0 | -0,44 | 0 |
| 6 | -10÷30 | 0 | -0,45 | 0 |
| 7 | -10-10 | 0 | 0 | 90 |
| 8 | -10-10 | 0 | 0 | 90 |

## 3. Aplikacja symulująca ruch robota dwunożnego

Prezentowany program komputerowy (rysunek 3) pozwala na symulowanie dowolnych ruchów robota kroczącego. Ponadto aplikacja umożliwia podgląd wykonywanych ruchów z wizualizacją poruszających się układów współrzędnych skojarzonych z kolejnymi członami [6]. Ruch robota może być generowany w programie (rysunek 4) lub wczytywany z pliku, który zawiera odpowiednie wartości katów obrotów.


SYMULATOR CHODU RODOTA DWUNOŻNEGO
Wpisywanie danych RESET Play Stop Zapisz/Wczytaj
SYMULATOR CHODU RODOTA DWUNOŻNEGO
Wpisywanie danych RESET Play Stop Zapisz/Wczytaj

Rys. 3. Scena z symulowanym robotem oraz z wizualizacją układów współrzędnych




Rys. 4. Modyfikacja wartości kątów obrotu

W celu zaprogramowania dowolnego ruchu należy podzielić ten ruch na pośrednie etapy, co zostało przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2

Przykład realizacji złożonego ruchu

| i | M | BP1 | BP2 | BP3 | KP | KSP1 | KSP2 | KSP3 | BL1 | BL2 | BL3 | KL | KSL1 | KSL2 | KSL3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 |
| 1 | 0 | 25 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | -25 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 |
| 3 | 0 | -25 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 25 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 |

Litera *B* z kolejną cyfrową oznacza kolejne obroty w stawie biodrowym, *K* oznacza obrót w stawie kolanowym, *KS*, z kolejną cyfrą, obroty w stawie kostkowy, a dodatkowe litery *P* i *L* określają odpowiednio prawą oraz lewą nogę.

## 4. Podsumowanie

Opracowanie równań kinematyki oraz analiza ruchu człowieka pozwoliła na stworzenie aplikacji umożliwiającej obserwację chodu robota dwunożnego. Stworzony symulator umożliwia zaprogramowanie dowolnego chodu przypominającego poruszającego się człowieka, również z wadami kończyn dolnych. Piętnaście stopni swobody w zupełności wystarczy, aby z dość dobrą dokładnością odwzorować chód. Nie znaczy to jednak, że analiza ruchów człowieka należy do prostych zagadnień. Złożoność procesu, jakim jest poruszanie się zmusza do pomijania pewnych etapów zastępując je pośrednimi wartościami.

LITERATURA

1. Bober T., Zawadzki J.: Biomechanika układu ruchu człowieka, Wydawnictwo BK, Wrocław, 2006.
2. Bekey G.: Autonomous Robots. From Biological Inspiration to Implementation and Control , MIT Press, 2005.
3. Churchill D.: Quantification of Human Knee Kinematics Using the 3DM-GX1 Sensor, Microstrain Inc., 2004.
4. Gedliczka A., Pochopień P., Szklarska A., Welon Z.: Atlas miar człowieka : dane do projektowania i oceny ergonomicznej, Warszawa, Centralny Instytut Ochrony Pracy, 2001.
5. Gomez N., Wu J., Shi M., Tosunoglu S. (2006) Sprainy: Design and Prototype Development of an 8-Degree-of-Freedom Walking Biped Robot, Florida Conference on Recent Advances in Robotics and Robot Showcase FCRAR 2006, Miami, Florida, May 25-26.
6. Hung Q., Yokoi K., Kajita S., Kaneko K., Arai H., Koyachi N., Tanie K.: Planning walking patterns for a biped robot, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no 3, 2001, pp.: 280-289.
7. Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W.: Modelowanie i sterowanie robotów, PWN, Warszawa, 2003.
8. Szkodny T.: Modelowanie i symulacja ruchu manipulatorów robotów przemysłowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka z. 140, Gliwice, 2004.
9. Zielińska T.: Maszyny kroczące, PWN, Warszawa, 2003.
10. Zonfrilli F.: Theoretical and experimental issues in biped walking control based on passive dynamics, PhD Thesis, Universita Degli Studi Di Roma, 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż:

**Abstract**

The paper describes a kinematics model of biped robot. The model is based on kinematics of human body. We present model of two legged robot using standard Denavit-Hartenberg method. The biped robot has 15 degrees of freedom. The forward kinematics is described by 1÷8 formulae. The kinematics scheme of robot is presented on figure 1. A table 1 describes a range of change of each configuration coordinates. Furthermore this paper shows application that can be use to program almost each motion of biped robot.